

カスコード差動増幅器について

武石 泰亮*・中島 昌利**

(受理 昭和43年5月31日)

CASCODE DIFFERENCE AMPLIFIER

Taisuke TAKEISHI* and Masatoshi NAKASHIMA**

An amplification of the low-level DC voltage is studied. The paper describes characteristics of cascode difference amplifiers, which have characteristics of low noise, high voltage-gain and low drift.

Experiment is made on a circuit using 12AX7. Results show good agreement with the theoretical analysis. Linearity of the device is tested.

1. はし が き

熱電対の過渡特性をブラウン管オシロにて観測するには 50~60 db 程度の直流増幅を行わねばならない。低レベルに於ける高利得の直流増幅器ではドリフトが問題になるが差動増幅器はこの点優れている²⁾³⁾。又増幅器自身が低雑音であることが望ましい。高利得

の低雑音の増幅回路としては三極管を縦続接続したカスコード回路が優れている¹⁾。従つてこの両者を組合せたカスコード差動増幅器は最適な増幅器と考えられる⁴⁾。前述の目的のためカスコード差動増幅器を試作したので、その特性について報告する。

2. 回路の計算

カスコード差動増幅器を図1に示す。 V_1 と V_2 、或は V_3 と V_4 のグリッド間に入力を与え、 R_e の両端

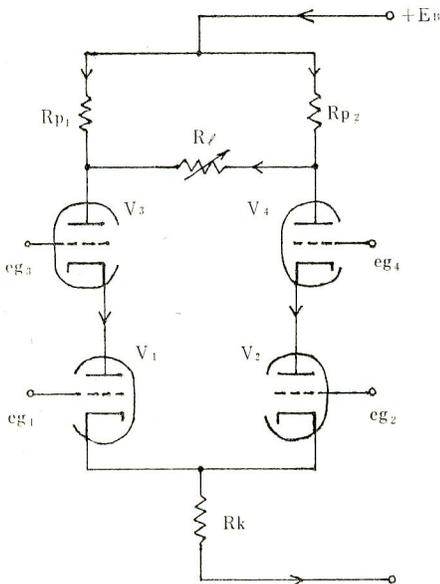


図1 R_{p1} , R_{p2} , R_l : 負荷抵抗 R_k : 陰極抵抗 e_{g1} , e_{g2} , e_{g3} , e_{g4} : 各真空管のグリッド電圧

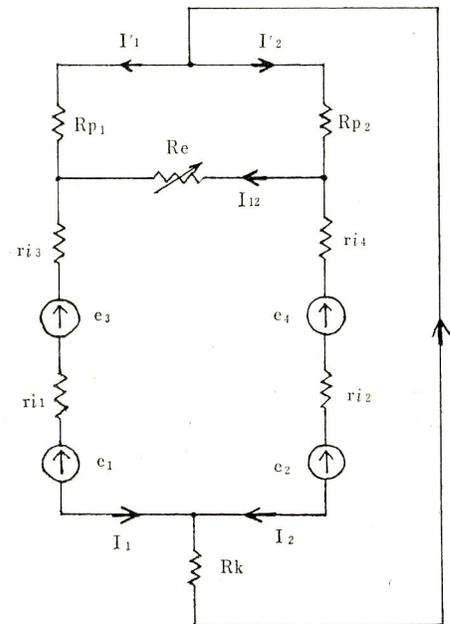


図2 r_{i1} , r_{i2} , r_{i3} , r_{i4} : 真空管の内部抵抗 e_1 , e_2 , e_3 , e_4 : プレートとカソード間の電圧

* 鹿児島大学工学部電気工学教室・助教授

** 同上・専攻科学生 (現 鹿児島大学大学院工学研究科電気工学専攻・学生)

から出力を取り出す。使用目的が直流から 1000 Hz 以下の低周波増幅用であるから真空管の電極間容量は無視し図 2 の様な等価回路に置き換えられる。図 2 に於て、電流は矢印の向きに流れるものとする。従つて、キルヒホッフの法則より、

$$I_1 - I_1' - I_{12} = 0 \quad (1)$$

$$I_2 - I_2' + I_{12} = 0 \quad (2)$$

$$I_1' R_{p1} - I_2' R_{p2} - I_{12} R_e = 0 \quad (3)$$

$$e_1 + e_3 - e_2 - e_4 = -(r_{i1} + r_{i3}) I_1 + (r_{i2} + r_{i4}) I_2 - R_e I_{12} \quad (4)$$

$$e_1 + e_3 + (r_{i1} + r_{i3}) I_1 + R_k (I_1 + I_2) + R_{p1} I_1' = 0 \quad (5)$$

但し、

$$e_1 = -[e_{g1} - (I_1 + I_2) R_k] \mu_1 \quad (6)$$

$$e_2 = -[e_{g2} - (I_1 + I_2) R_k] \mu_2 \quad (7)$$

$$e_3 = -[e_{g3} - e_1 - (I_1 + I_2) R_k - I_2 r_{i1}] \mu_3 \quad (8)$$

$$e_4 = -[e_{g4} - e_2 - (I_1 + I_2) R_k - I_2 r_{i2}] \mu_4 \quad (9)$$

従つて、(1)~(9) 式から、

$$R_{p1} I_1 - R_{p2} I_2 - (R_{p1} + R_{p2} + R_e) I_{12} = 0 \quad (10)$$

$$\{r_{i13} + (\mu_{13} - \mu_{24}) R_k\} I_1 - \{r_{i24} - (\mu_{13} - \mu_{24}) R_k\} I_2 + R_e I_{12} = e_{g13} - e_{g24} \quad (11)$$

$$\{r_{i13} + (\mu_{13} + 1) R_k + R_{p1}\} I_1 + (\mu_{13} + 1) R_k I_2 - R_{p1} I_{12} = e_{g13} \quad (12)$$

但し、

$$r_{i13} = (\mu_3 + 1) r_{i1} + r_{i3}$$

$$r_{i24} = (\mu_4 + 1) r_{i2} + r_{i4}$$

$$\mu_{13} = \mu_1 (\mu_3 + 1) + \mu_3$$

$$\mu_{24} = \mu_2 (\mu_4 + 1) + \mu_4$$

$$e_{g13} = \mu_1 (\mu_3 + 1) e_{g1} + \mu_3 e_{g3}$$

$$e_{g24} = \mu_2 (\mu_4 + 1) e_{g2} + \mu_4 e_{g4}$$

故に、出力電流 I_{12} は次の様になる。

$$I_{12} = [R_{p1} R_{p2} (e_{g13} - e_{g24}) + (R_{p1} + R_{p2}) \{e_{g13} (\mu_{24} + 1) R_k - e_{g24} (\mu_{13} + 1) R_k\} + \{R_{p1} r_{i24} e_{g13} - R_{p2} r_{i13} e_{g24}\}] / [(R_{p1} + R_{p2} + R_e) \{r_{i13} r_{i24} + r_{i13} (\mu_{24} + 1) R_k + r_{i24} (\mu_{13} + 1) R_k\} + R_{p1} R_{p2} R_e + R_{p1} R_e (\mu_{24} + 1) R_k + R_{p2} R_e (\mu_{13} + 1) R_k + R_{p1} (R_{p2} + R_e) r_{i24} + (R_{p1} + R_e) R_{p2} r_{i13}] \quad (13)$$

一般に V_1, V_2, V_3, V_4 を同じ真空管にすれば、増幅率や内部抵抗は各々等しくなり、

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu, \quad r_{i1} = r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = r_i,$$

$$r_{i13} = r_{i24} = (\mu + 2) r_i, \quad \mu_{13} = \mu_{24} = \mu(\mu + 2)$$

を得る。又 $R_{p1} = R_{p2} = R_p$ とすることにより (13) 式は、

$$I_{12} = \frac{R_p (e_{g13} - e_{g24})}{(2R_p + R_e)(\mu + 2)r_i + R_p R_e} = \frac{R_p \{\mu(\mu + 1)(e_{g1} - e_{g2}) + \mu(e_{g3} - e_{g4})\}}{(2R_p + R_e)(\mu + 2)r_i + R_p R_e} \quad (14)$$

となる。(14) 式に於て下段の $V_1 V_2$ のグリッドから入力を加えた場合と、上段の $V_3 V_4$ のグリッドからだけ入力を加えたときの出力特性は以下の様になる。

1) 下段より入力を加えた場合

V_3 と V_4 のグリッドを同電位とし、 V_1 と V_2 のグリッド間に入力を与えると、出力の電流 I_{12} 、電圧 $V_{12} = I_{12} R_e$ 、電力 $P_{12} = I_{12}^2 R_e$ は (14) 式から、

$$I_{12} = \frac{\mu(\mu + 1) R_p (e_{g1} - e_{g2})}{(2R_p + R_e)(\mu + 2)r_i + R_p R_e} \quad (15)$$

$$V_{12} = \frac{\mu(\mu + 1) R_p R_e (e_{g1} - e_{g2})}{(2R_p + R_e)(\mu + 2)r_i + R_p R_e} \quad (16)$$

$$P_{12} = \frac{\mu^2 (\mu + 1)^2 R_p^2 R_e (e_{g1} - e_{g2})^2}{\{(2R_p + R_e)(\mu + 2)r_i + R_p R_e\}^2} \quad (17)$$

出力電力 P_{12} の最大値 $P_{12\max}$ とその時の R_e の値を求めると、 $\partial P_{12} / \partial R_e = 0$ より、

$$R_e |_{P_{12\max}} = \frac{2(\mu + 2) r_i R_p}{(\mu + 2) r_i + R_p} \quad (18)$$

$$P_{12\max} = \frac{\mu^2 (\mu + 1)^2 R_p^2 (e_{g1} - e_{g2})^2}{8(\mu + 2) r_i \{(\mu + 2) r_i + R_p\}} \quad (19)$$

さらに、電圧増幅度 A_{12} 、と入力対出力の相互コンダクタンス g_{m12} は次の様になる。

$$A_{12} = \frac{\partial V_{12}}{\partial (e_{g1} - e_{g2})} = \frac{\mu(\mu + 1) R_p R_e}{(2R_p + R_e)(\mu + 2) r_i + R_p R_e} \quad (20)$$

$$g_{m12} = \frac{\partial I_{12}}{\partial (e_{g1} - e_{g2})} = \frac{\mu(\mu + 1) R_p}{(2R_p + R_e)(\mu + 2) r_i + R_p R_e} \quad (21)$$

$R_e \rightarrow \infty$ とした時の電圧増幅度と $R_e \rightarrow 0$ とした時の電流増幅度は、次の様になる。

$$\lim_{R_e \rightarrow \infty} V_{12} = \frac{\mu(\mu + 1) R_p}{(\mu + 2) r_i + R_p} (e_{g1} - e_{g2}) \quad (22)$$

$$\lim_{R_e \rightarrow 0} I_{12} = \frac{\mu(\mu + 1)}{2(\mu + 2) r_i} (e_{g1} - e_{g2}) = \frac{g_m}{2} (e_{g1} - e_{g2}) \quad (23)$$

2) 上段より入力を加えた場合

V_1 と V_2 のグリッドを同電位にし、 V_3 と V_4 のグリッド間に入力を加える。そこで、(15)~(23) 式を得たように、同様の計算を行えば、(24)~(32) 式を得る。

$$I_{12} = \frac{\mu R_p (e_{g3} - e_{g4})}{(2R_p + R_c)(\mu + 2)r_i + R_p R_c} \quad (24)$$

$$V_{12} = \frac{\mu R_p R_c (e_{g3} - e_{g4})}{(2R_p + R_c)(\mu + 2)r_i + R_p R_c} \quad (25)$$

$$P_{12} = \frac{\mu^2 R_p^2 R_c (e_{g3} - e_{g4})^2}{\{(2R_p + R_c)(\mu + 2)r_i + R_p R_c\}^2} \quad (26)$$

$$R_c |_{P_{12} \max} = \frac{2(\mu + 2)r_i R_p}{(\mu + 2)r_i + R_p} \quad (27)$$

$$P_{12 \max} = \frac{\mu^2 R_p (e_{g3} - e_{g4})^2}{8(\mu + 2)r_i \{(\mu + 2)r_i + R_p\}} \quad (28)$$

$$A_{12} = \frac{\partial V_{12}}{\partial (e_{g3} - e_{g4})} = \frac{\mu R_p R_c}{(2R_p + R_c)(\mu + 2)r_i + R_p R_c} \quad (29)$$

$$g_{m12} = \frac{\partial I_{12}}{\partial (e_{g3} - e_{g4})} = \frac{\mu R_p}{(2R_p + R_c)(\mu + 2)r_i + R_p R_c} \quad (30)$$

$$\lim_{R_c \rightarrow \infty} V_{12} = \frac{\mu R_p}{(\mu + 2)r_i + R_p} (e_{g3} - e_{g4}) \quad (31)$$

$$\lim_{R_c \rightarrow 0} I_{12} = \frac{\mu R_p (e_{g3} - e_{g4})}{2R_p(\mu + 2)r_i} = \frac{1}{2r_i} (e_{g3} - e_{g4}) \quad (32)$$

ここで、(18) 式と (27) 式は同じ値となり、又、(15) 式は (24) 式の $(\mu + 1)$ 倍、(17) 式は (26) 式の $(\mu + 1)^2$ 倍の結果を得る。

3. 実験装置及び結果

図 3 の回路で実験を行つた。まず、 $e_{g3} = e_{g4}$ を $56V$ の一定な電圧とするため電流計 A_2 ($50 \mu A$ の電流計と $1.4 M\Omega$ の抵抗で $70V$ の電圧計として使用) で監視しながら、 $I_{12} = 0$ となるように $1 M\Omega$ の負荷抵抗を調整した後、標準抵抗による微小な入力を e_{g1} と e_{g2} の間に加え R_c の両端の出力電流を電流計 A_1 で測定した。この結果は図 4 に示されるように $200 mV$ 位までの入力に対してほとんど直線性を持ち、差動特性も良好である。次に図 5 に示される結果も前述の様に $e_{g1} - e_{g2}$ を $0V$ にして、 e_{g3} と e_{g4} の間に入力を加え電流計 A_1 によつて出力電流を測定したもので、これは完全な直線性を有している。

さらに、下段から入力を加えたとき、入力電圧を

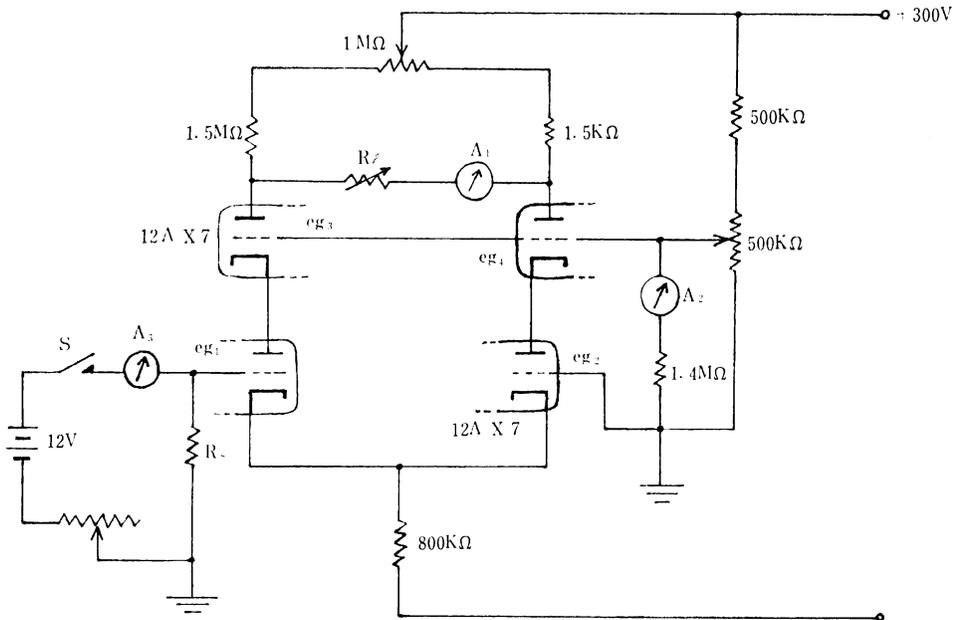


図 3 R_s は標準抵抗 ($1\Omega, 10\Omega$)

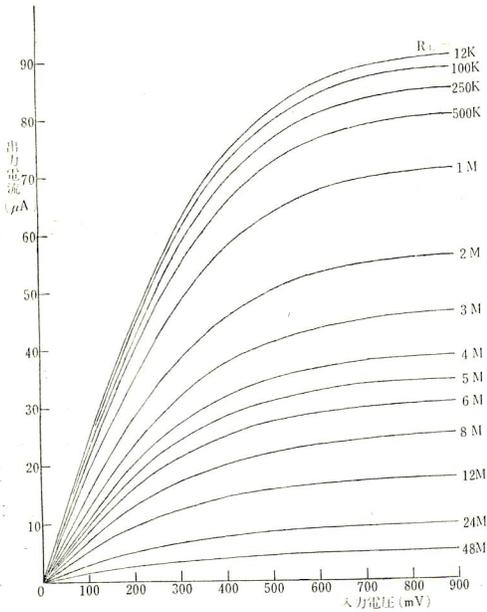


図 4

上段から入力を与えた場合

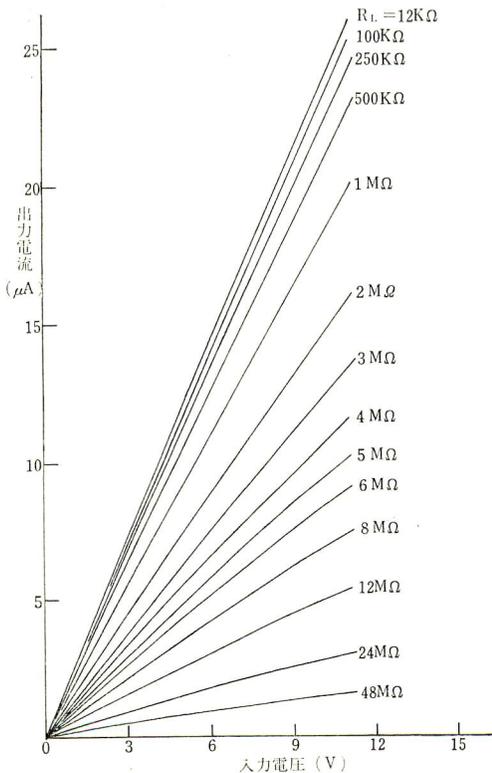


図 5

50 mV (一定) にして R_e を変えたときの出力電流 I_{12} の変化を図 6 に示す. 次に上段から入力を加えたときの入力電圧を 3 V (一定) にして R_e を変えたときの出力電流 I_{12} の変化は図 7 に示す.

ここで, 図 6 と図 7 に示される実験の電圧増幅度曲線 A_{12} を比較すると, ほとんど同じ形を示し, 図 6 の A_{12} が図 7 の A_{12} の約 100 倍の値になっている. そして, (20) 式が (29) 式より $(\mu+1)$ 倍となっているため, 一応 μ を 100 として (この値は真空管 12 AX 7 の特性表の値と一致), (23) 式の $\lim_{R_e \rightarrow 0} I_{12}$ が図 6 より $g_m=490 \approx 500 \mu S$ と推定されるので, $r_i = \mu/g_m$ から $r_i=200 k\Omega$ となり, 又, (32) 式の $\lim_{R_e \rightarrow 0} I_{12}$ が図 7 より $r_i=200 k\Omega$ と推定できたので, 真空管の 3 定数はほぼ $\mu=100$, $g_m=500 \mu S$, $r_i=200 k\Omega$ で動作していると考えられる. そして, この 3 定数で理論式より求められた I_{12} , A_{12} , P_{12} の曲線を描くと図 6, 図 7 に見られるような実験値とほとんど同じ形を示し, 可成りよく合致している. 又, P_{12} が最大となる時の R_e の値は, 図 6 や図 7 に見られる通り計算値及び実験値共に, 3.6~4.0 M Ω 附近の値となっている.

但し, I_{12} や A_{12} はほぼ μ^2 , P_{12} は μ^4 (計算式より) に比例しているし, ことに P_{12} の計算値による曲線は実験で求めた曲線と多少違っているが, これは μ を 95 位に選べば実験値と理論値がもつとよく一致するのではないかと考えられる.

4. あとがき

この実験では負荷抵抗大なるため, 陽極電流が 100 μA 位しか流れずプレートとカソード間の電圧が 56 V 程度の低い電圧となり, 約 58 db までの電圧利得に終わった. 従つて, 陽極電流及びプレートとカソード間の電圧を増すように電源電圧を高めれば, 真空管の相互コンダクタンス g_m も大きくなり (14) 式から分るようにさらに高い電圧利得 (60 db 以上) が得られると思う.

差動特性は図 4, 図 5 で見られるように, ほとんど直線性を有する良好な形であつた.

以上よりカスコード差動増幅器は熱電対の過渡特性のみならず, 低レベルの電圧を増幅する装置として優れていると考えられる.

文 献

- 1) Neil T. Larsen : Low-Level Low-Frequency Detection System, Rev. Sci. Instr., 33 (1962),

下段から入力を与えた場合

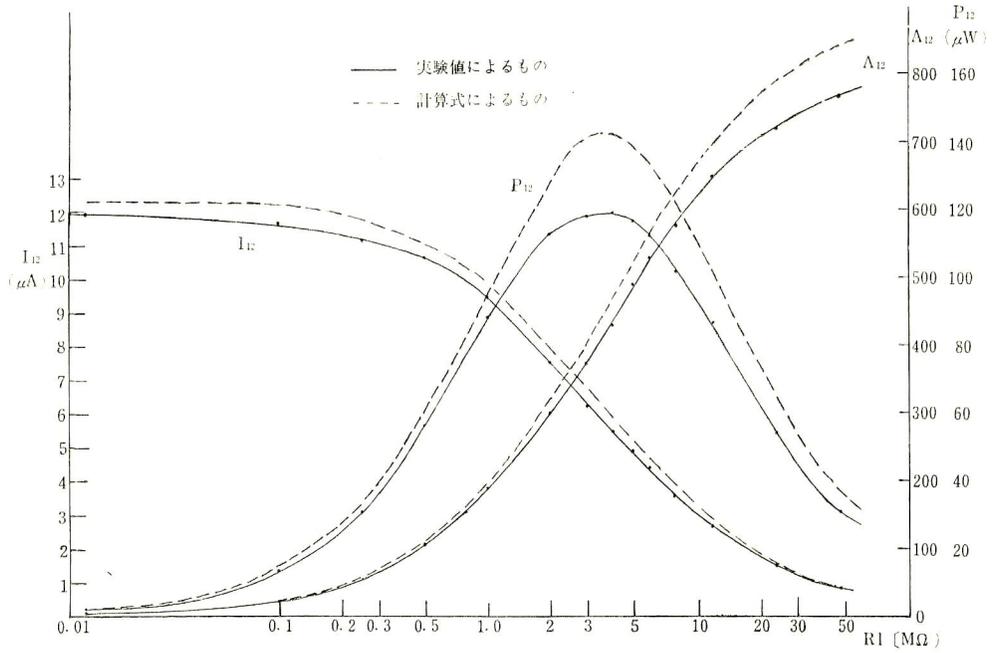


図 6

上段から入力を与えた場合

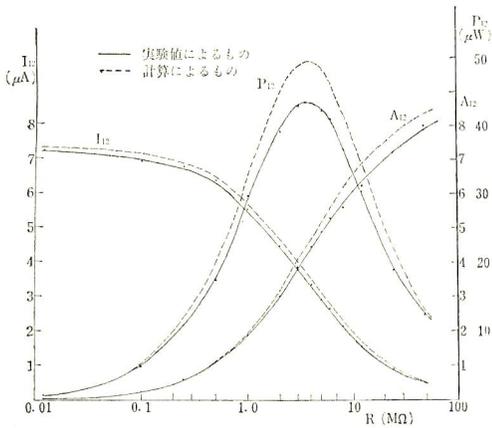


図 7

1200.

- 2) Valley Wallman : Differential Amplifiers, Vacuum Tube Amplifiers (1948), 441.
- 3) W. C. Elmore and Mathew Sands : Difference Amplifiers, Electronics(1949), 52.
- 4) 武石・中島：電気四学会九州支部連合大会講演論文集，第20回（昭42.11）.